



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ciencias Físicas

Escuela Profesional de Física

**Caracterización de temperaturas mínimas asociadas a
heladas extremos usando WRF, en la parte sur del
Perú**

MONOGRAFÍA TÉCNICA

Para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

AUTOR

José Antonio MAMANI PUMAYLLE

ASESOR

Octavio FASHE RAYMUNDO

Lima, Perú

2018



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Mamani, J. (2018). *Caracterización de temperaturas mínimas asociadas a heladas extremos usando WRF, en la parte sur del Perú*. [Monografía técnica de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Física]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE MONOGRAFÍA TÉCNICA PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN FÍSICA

Siendo las 18:00 horas del 02 de mayo de 2018, en el Salón de Grados de la Facultad de Ciencias Físicas (Auditorio 109), bajo la Presidencia del Mg. Melchor Nicolás Llosa Demartini (Presidente), Lic. José Carlos Eche Llenque (Miembro), y el Mg. Octavio Fashé Raymundo (Asesor), se dio inicio a la Sesión Pública de Sustentación de Monografía Técnica para la Licenciatura en Física, mediante la Modalidad M3 – Por Suficiencia Profesional, del Bachiller:

JOSÉ ANTONIO MAMANI PUMAYLLE

Dando lectura al Resumen del Expediente, el Presidente del Jurado, invitó al Bachiller José Antonio Mamani Pumaylle a realizar una exposición del Trabajo de Monografía Técnica titulada: "Caracterización de temperaturas mínimas asociadas a heladas extremas usando WRF, en la parte sur del Perú".

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente, invitó al Bachiller y al público a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión, para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado. Asimismo, se verificó que el promedio obtenido por el bachiller en el VIII Ciclo de Actualización Profesional es de QUINCE (15).

Al término de la deliberación del Jurado el Mg. Melchor Nicolás Llosa Demartini, invitó al candidato y al público a pasar a la Sala de Sesión, para dar lectura al resultado de la deliberación. Ha obtenido la calificación de:

15

NOTA DEL VIII CAP

15

NOTA DE LA SUSTENTACIÓN
DE LA MONOGRAFÍA

15

PROMEDIO

Finalmente, el Presidente del Jurado, propone al Consejo de la Facultad que se le declare Licenciado en Física al Bachiller José Antonio Mamani Pumaylle En virtud de haber obtenido un promedio de.....QUINCE..... (15). Según el artículo 46° del Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ciencias Físicas. Siendo las ...18:45...Horas, se levanta la Sesión.

Mg. Melchor Nicolás Llosa Demartini
PRESIDENTE

Lic. José Carlos Eche Llenque
MIEMBRO

Mg. Octavio Fashé Raymundo
ASESOR

Agradecimientos

Elaborar este trabajo ha sido posible a muchas personas que con su tiempo y aportes he podido concluir. Agradecimiento especial debo a mi familia y hermanos y especialmente a la pequeña Cristina, siendo ella la que me da fuerzas para seguir adelante. También debo expresar mi agradecimiento a los profesores, especialmente a mi asesor Mg. Octavio Fashe Raymundo, compañeros y amigos por su gran apoyo y comprensión incondicional.

Resumen

La helada es un fenómeno meteorológico que ocasiona fuertes impactos negativos en la agricultura y ganadería. Por lo que afecta directamente la economía de la población en especial frecuentemente la parte sur del Perú sufre por este fenómeno. La helada principalmente se debe por el descenso de la temperatura, de tal manera que para cuantificar este fenómeno se utiliza la variable física denominada temperatura mínima. En este trabajo se analizó la variación espacial de la temperatura mínima y máxima en la región de Puno con el objetivo de identificar áreas de mayor impacto a través de simulación numérica. El periodo de estudio corresponde para el mes de agosto de 2015 siendo el pico de ocurrencia de helada.

Como resultado se encontró que entre las estaciones de Juliaca y Paratia existe fuerte gradiente de temperatura mínima y máxima, asimismo se encontró que desde la estación Vilavila hacia el Sur pasando por estación Paratia se extiende una franja bien marcada de temperatura muy fría. Como conclusión se puede afirmar que las heladas varían localmente en la región de Puno donde estos fenómenos están fuertemente relacionados a la orografía.

Índice de figuras

1.1. Localización del área de estudio, fuente http://investigacion.upeu.edu.pe/conacin/index.php?id=acerca-de-puno	4
2.1. Zona susceptible a heladas, fuente http://www.cenepred.gob.pe/web/	11
2.2. Zonas de riesgo en la región Andina del Perú, fuente http://www.senamhi.gob.pe/?p=distrito-helada-friajes	12
2.3. Esquema de balance de radiación durante el día y la noche, fuente (Novoa, 2004)	14
3.1. Esquema de preprocesamiento son: geogrid.exe, ungrib.exe y met-grid.exe, donde real.exe y wrf.exe son del procesamiento del modelo, fuente (?)	23
3.2. Localización del área de estudio	26
4.1. Se muestra el ciclo diurno de la temperatura a una altura de 2m sobre la superficie durante el mes de agosto de 2015 desde la salida de WRF a) Estación Lampa b) Estación Juliaca	31
4.2. Se muestra la comparación de temperaturas máximas y mínimas en estación Juliaca, durante el mes de agosto de 2015 tanto observado así como el modelado a) temperatura máxima b) temperatura mínima	32
4.3. Se muestra la comparación de temperaturas máximas y mínimas en estación Paratia, durante el mes de agosto de 2015 tanto observado así como el modelado a) temperatura máxima b) temperatura mínima	33
4.4. Se muestra la comparación de temperaturas máximas y mínimas en estación Vilvaria, durante el mes de agosto de 2015 tanto observado así como el modelado a) temperatura máxima b) temperatura mínima	34

4.5. Se muestra la distribución espacial del promedio de la temperatura a 2m de altura a nivel de puno durante el mes de agosto de 2015 a) temperatura máxima b) temperatura mínima	35
---	----

Índice de tablas

2.1. Características de cada tipo de heladas, fuente (Estrada, 2011)	10
2.2. Distritos con zonas críticas de heladas, fuente https://www.inei.gob.pe/	13
3.1. Esquema de parametrización utilizado para ejecución del modelo WRF	25

Lista de abreviaturas y siglas

WRF	-	Weather Research and Forecasting model
SENAMHI	-	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
IMARPE	-	Instituto Mar Peruano
IGP	-	Instituto Geofísico del Perú
MINAM	-	Ministerio del Ambiente
MATLAB	-	Matrix Laboratory
NOAA	-	National Oceanic and Atmospheric Administration

Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	II
Lista de abreviaturas y siglas	VI
1. Introducción	1
1.1. Objetivo General	3
1.2. Objetivos específicos	3
1.3. Área de Estudio	4
2. Fundamento teórico	5
2.1. Tipos de heladas de acuerdo a su intensidad	7
2.2. Tipos de heladas por su aspecto visual	9
2.3. Tipos de heladas por su origen climatológico	9
2.3.1. Heladas radiativas	9
2.3.2. Heladas Advectivas	10
2.4. Areas geograficas con temperaturas mínimas	11
2.5. Identificación y priorización	11
2.6. Distritos con zonas críticas ante heladas	12
2.7. Balance termico en una helada	13
2.8. Aspectos físicos	14
2.8.1. Nubosidad	16
2.9. Modelo WRF	16
2.10. El WRF en mesoescala	18
2.11. Investigaciones en Perú con el modelo WRF	19

3. Metodología	22
3.1. Configuración del WRF	22
3.1.1. Pre-procesamiento de WRF	22
3.1.2. Procesamiento del WRF	23
3.1.3. Post procesamiento del WRF	24
3.2. Simulación del WRF	24
4. Resultados y discusiones	27
5. Conclusiones	36
Bibliografía	37

Capítulo 1

Introducción

En el Perú se presentan heladas sobre todo en las partes altas del sur del país, asimismo las bajas temperaturas pueden generar grandes impactos en las ciudades principales (Cuzco, Apurímac, Arequipa, etc). En el Perú se han implementando el uso de modelos atmosféricos, en los cuales el modelo WRF, usando el WRF se ha trabajado en el monitoreo en la cuenca del río Ilaya; Simulación numérica de la circulación oceánica del Pacífico Suroriental por usando en parte WRF por Saavedra. Entre los trabajos de uso con WRF tenemos también podemos mencionar: modelación de tormentas convectivas por Glvez y Douglas, Chamorro (2012); comportamiento de la atmósfera en Perú, Pasapera y Saavedra (2013): configuración de WRF implementada en SENAMHI-PUNO. pronóstico de nevadas, “estudio de nubes bajo el Pacífico” (IGP), influencia de la orografía sobre la precipitación de los Andes tropicales (Junquas2013), “mecanismos orográficos” asociados a la dinámica atmosférica. (Moure-2016) Estimar la capacidad del modelo WRF para pronosticar las heladas intensas en la región andina y estudiar su dinámica bajo el cual el modelo WRF podría aplicarse para pronósticos de Heladas. La gravedad de una helada depende de la disminución de la temperatura del aire y de la resistencia de los seres vivos a ella. Este fenómeno puede provocar pérdidas a la agricultura y afectar mucho a personas que tienen viviendas frágiles o están a la intemperie y se presenta sobre todo durante la época invernal y a fines de la otoñal. Pero también el frío ambiental puede congelar la superficie del cuerpo, aumentar la presión arterial y exigir un mayor esfuerzo al corazón, por lo que los riesgos de infarto y enfermedades cardiovasculares también se incrementan. Podemos observar que este modelo numérico se ha ido implementando con mayor frecuencia en el Perú, así como en Sudamérica, no cabe duda que constituye una herramienta importante para poder corroborar,

explicar y entender el comportamiento de la naturaleza como comportamiento atmosférico.

1.1. Objetivo General

A traves de modelamiento numérico caracterizar la distribución espacial de las temperaturas mínimas y máximas, la primera esta asociada a la ocurrencia de las heladas.

1.2. Objetivos específicos

- Evaluar la performance del modelo WRF en la parte sur del Perú
- Analizar la variación de temperaturas mínimas y máximas desde la salida del WRF
- Comparar las temperaturas mínimas modelada y observada
- Identificar areas a posible ocurrencia de las heladas

1.3. Área de Estudio

En la zona sur de nuestro país, hemos podido observar que las heladas afectan frecuentemente a la población como a la agricultura, causando grandes pérdidas económicas y afecta fundamentalmente el desarrollo de las comunidades campesinas. Por lo tanto se propuso el uso del modelo numérico de predicción específicamente el modelo atmosférico WRF. Por otro lado, usando el modelo WRF se han hecho estudios similares en Bolivia y Argentina, que se ha logrado la mayor efectividad en la predicción y en la toma de decisiones para salvaguardar en la economía y desarrollo de la población.

El area de estudio se encuentra localizado region Puno compuesto por los distritos: Lampa, Juliaca, Paratia y Vilavila. la distribución de las mismas se muestra la figura 1.



Figura 1.1: Localización del área de estudio, fuente <http://investigacion.upeu.edu.pe/conacin/index.php?id=acerca-de-puno>

Capítulo 2

Fundamento teórico

Las heladas son fenómenos climatológicos de descensos de temperatura que afecta a la zona sierra de Perú entre los meses de mayo y septiembre, generando consecuencias como infecciones respiratorias agudas. Por otro lado, SENAMHI define que la helada son factores meteorológicas que dependiendo de su intensidad, duración y fase fenológica en que se encuentre el cultivo, puede provocar graves daños a la agricultura y sobre sus consecuencias, asimismo indica que es de suma importancia conocer el régimen de las heladas durante el año y sus características micrometeorológicas y agroclimáticas para prever la posibilidad de ocurrencia, alerta y adecuarlos a métodos de defensa (GÓMEZ, 2010).

Desde el punto de vista agrometeorológico, la helada es la ocurrencia de una temperatura igual o menor a 0°C a un nivel de 1.5 o 2.0 m sobre el nivel del suelo (Artunduaga and Torrez, 1982). Desde el punto de vista agrometeorológico; la helada podría definirse como la temperatura a la cual los tejidos de la planta comienzan a sufrir daños, sin embargo, es difícil establecer la temperatura crítica para cada cultivo ya que la severidad del daño depende de otros factores, como ser: el estado de desarrollo vegetativo y tipo de cultivo, condiciones del suelo, duración de la helada entre otros.

Como consecuencia de las temperaturas bajas, en la planta se suceden los siguientes pasos: existe un desplazamiento de los equilibrios biológicos frenándose la respiración, fotosíntesis y por lo tanto esto afecta mucho al hombre, hay que tener en cuenta que la sensibilidad que un vegetal tiene al frío depende de su estado de desarrollo. Los estados fenológicos más vulnerables al frío son la floración y el cuajado de frutos.

Muchos vegetales han creado resistencia natural al frío y crean métodos de de-

fensa contra heladas. Se distinguen dos tipos de métodos para controlar las heladas en la agricultura: el primero, los métodos pasivos:

- a) Evitar el cultivo de especies o variedades sensibles a las bajas temperaturas, en zonas en donde existen probabilidades muy altas de que ocurran heladas.
- b) Elegir variedades resistentes y de mayor altura, para evitar contacto de las flores con el aire frío cercano al suelo.
- c) Las especies sensibles, no deben implantarse en depresiones. Preferir, en estos casos, los faldeos más cálidos
- d) Cuando exista una barrera, por ejemplo, una cortina cortaviento demasiado densa, el peligro de helada es mayor hacia el lado de arriba de la pendiente.
- d) Evitar la siembra de praderas, cereales, arbustos o viveros en la cercanía de un huerto frutal. Estos actúan como aislantes del flujo de calor del suelo, aumentando los riesgos de daño por heladas en cultivos bajos.
- f) Evitar el laboreo excesivo del suelo. De ser así se forma una capa de suelo suelta, que actúa como aislante del calor que fluye desde las capas más profundas del suelo hacia la superficie
- f) Mantener en lo posible el suelo libre de malezas, sin moverlo y no dejar mucha paja u otro material sobre el suelo.

Segundo, el metodos activos son aquellos aplicados justo al comenzar la helada y durante ella, el principio de estos métodos es muy simple: la helada se debe al frío, por lo tanto, debemos evitar el enfriamiento. Para evitar una helada es suficiente, en teoría, aportar a la superficie del suelo una energía igual a aquella perdida por dicha superficie, que es lo que provoca el enfriamiento. También existen métodos que actúan directamente sobre la temperatura de las plantas. Existen varias formas de provocar el calentamiento del aire:

- a) Inundación de terrenos, que aumenta la capacidad calórica del suelo y su conductividad térmica.

- b) Mezcla mecánica de aire, consiste en mezclar, con ayuda de grandes hélices, el aire frío cercano al suelo con el aire cálido de las capas atmosféricas más altas.
- c) Protección por interrupción de la radiación, consiste en evitar las pérdidas por radiación usando algún tipo de techo sobre la vegetación.
- d) Cortinas de humo, nubes o niebla. Considerando que el aire tiene la mala conductividad térmica y que la transmisión de calor a través de él, a los objetos que rodea, es difícil, se ha ensayado transferir el calor directamente a las plantas.
- f) Calentamiento del aire que rodea a la planta, consiste en calentar el aire frío que rodea a la planta, ya que es éste el que provoca el enfriamiento de los vegetales. Uno de los métodos más utilizados es encender quemadores (tarros) de petróleo, 100 a 300 por hectárea. Otra alternativa son los agitadores de aire caliente o los quemadores a gas.
- f) Aspersión de agua: el uso de aspersión con agua para luchar contra las heladas, aprovecha la liberación de calor que se produce al congelarse el agua (80 cal/g).
- f) Según estudios al colocar una pequeña capa de agua sobre una hoja que se está enfriando, la energía liberada por el agua al congelarse es aprovechada por la hoja, la temperatura de la hoja no descendiera de 0°C . Si la aspersión se mantiene constante, durante el período de temperaturas bajas, hasta que el hielo se haya fundido por acción del sol es importante tener en cuenta que, si se trata de un cultivo con ramas finas, el peso del hielo puede romperlas. La aspersión debe comenzar en el momento que la temperatura baje de 0°C y debe mantenerse sin interrupción hasta después de la salida del sol, de modo que el calentamiento de la atmósfera compense la absorción de calor producida por la fusión del hielo.

2.1. Tipos de heladas de acuerdo a su intensidad

No todas las heladas presentan el mismo grado de agresividad en las plantas, por lo que conviene reconocer qué tipo de helada se da en nuestra area para seleccionar plantas resistentes; Las Heladas suaves son cuando las temperaturas caen ligeramente por debajo de 0°C de forma excepcional y se recuperan pasadas unas horas.

Este tipo de heladas se dan en el clima mediterráneo y el clima atlántico u oceánico. La helada por evaporación es un tipo de helada suave que sufre la planta debido a la evaporación del agua o rocío que ha quedado en la superficie de las plantas tras la lluvia o el descenso de la humedad atmosférica. La evaporación del agua provoca pérdida de calor a la planta y descenso de la temperatura, pudiendo bajar de los cero grados centígrados.

Las Heladas medias. Las temperaturas caen por debajo de 0°C durante las noches y algunos días del invierno, siendo muy excepcional que se registren temperaturas por debajo de -10°C . Las heladas medias se producen principalmente en el clima continental húmedo y el clima continental mediterráneo. Las heladas medias suelen ser heladas por radiación, producidas por el enfriamiento de las capas más bajas de la atmósfera debido a la pérdida progresiva del calor de la tierra en noches de cielo despejado y ausencia de viento. Las heladas por radiación provocan la formación de una capa de hielo blanco sobre la superficie de la planta, lo que se denomina helada blanca. Las Heladas fuertes. Se trata de heladas muy severas en las que las temperaturas se mantienen por debajo de -10°C durante gran parte del invierno, situación habitual en el clima montañoso, el clima continental frío y el clima continental monzónico. Cabe mencionar un caso excepcional de helada fuerte, la helada por advección. Se produce por la entrada de una masa de aire seco y frío a temperatura inferior a 0°C , acompañada de vientos con velocidades superiores a los 15 km/h. Esta situación se da con cielos nublados o semi-cubiertos. La acción del aire frío, generalmente procedente de las regiones polares, puede durar varios días, deshidratando las plantas y acabando con los jugos celulares que la sirven de defensa frente a la helada. Las heladas por advección pueden llegar a matar a la planta. En tal caso, la planta sufrirá la denominada helada negra, por la coloración negra que ofrecerán todos los tejidos destruidos por el frío, es importante mencionar un caso excepcional de este tipo de heladas, la helada por advección que se produce por la entrada de una masa de aire seco provenientes de las regiones polares con velocidades superiores a los 15 m/s (Garreaud and Wallace, 1998).

Las heladas constituyen uno de los problemas de mayor incidencia e impacto económico en la agricultura a nivel mundial. Para la meteorología y para la agricultura en términos prácticos, una helada es la ocurrencia de temperaturas del aire bajo cero grados Celsius. Sus efectos han sido severos en especies de características subtropicales como el palto y los cítricos, en las especies de origen templado y floración temprana como el almendro, cerezo, o en especies sensibles como la vid y

algunos carozos. Las hortalizas son muy sensibles; en esos rubros las heladas originan pérdidas completas. Los impactos serán distintos dependiendo de la época en que ocurra la helada, la especie, el estado de desarrollo de la planta en ese momento y el tiempo de exposición.

2.2. Tipos de heladas por su aspecto visual

De acuerdo a como se forman las heladas, se puede señalar que existen dos tipos de heladas, por otro lado los efectos visuales que se presentan en las plantas, las heladas pueden ser: Heladas blancas o heladas negras. Según (Díaz, 1983; Pereyra Díaz et al., 2009) se indican lo siguientes.

- a) Las heladas blancas se forman cuando las masas de aire frío son húmedas, por lo que provocan condensación y formación de hielo sobre la superficie de las plantas y en objetos expuestos libremente a la radiación nocturna.
- b) Las heladas negras se desarrollan cuando el aire del ambiente se encuentra excesivamente seco, no existe condensación ni formación de hielo sobre la superficie y la vegetación presenta una coloración .

2.3. Tipos de heladas por su origen climatológico

2.3.1. Heladas radiativas

Las heladas radiativas son las que están relacionadas con la fuga intensa, durante la noche, del calor que se ha acumulado en el suelo durante el día, provocando un enfriamiento de las capas bajas de la atmósfera próxima a la superficie. Esto ocurre cuando el cielo nocturno se encuentra despejado, sin viento y el aire tiene baja humedad. Este enfriamiento da origen a la capa de inversión térmica donde su altura depende de la topografía local y de las condiciones meteorológicas, se encuentra el punto divisorio entre aire frío y aire caliente, generalmente entre 90 y 60 metros. Este tipo de heladas predomina a fines de otoño, durante el invierno y a comienzos de primavera y se caracteriza por cubrir con hielo la superficie del follaje. Las plantas amanecen con una capa blanca y por esta razón se denominan heladas

blancas. Asimismo las heladas radiativas producen por la pérdida de energía en forma de radiación de longitud de onda bastante mas larga que la radiación solar, que experimentan todos los cuerpos que almacenan calor (Gala, 1993).

2.3.2. Heladas Advectivas

Las heladas advectivas son aquellas que ocurren por desplazamiento de masas de aire frío provenientes desde el sur, cubriendo áreas extensas de territorio. Son condiciones mas persistentes, pudiendo extenderse por varias horas en la noche y parte de la mañana o por varias noches seguidas. Estas heladas se asocian con aire mas seco y frío, por lo que son más dañinas para las plantas. Se presentan ocasionalmente, pero por sus características, generan grandes daños (Estrada, 2011). Estas heladas son ocasionadas por la entrada de una masa de aire muy frío, de origen polar, con temperaturas de varios grados bajo cero y que al ir avanzando va enfriando y congelando todo, afortunadamente estos en nuestras zonas son muy poco frecuentes, son mas comunes en cambio en el hemisferio norte, en su desplazamiento, las capas de aire en contacto con el suelo a medida que avanzan se van calentando por transferencia de calor desde el suelo hasta la capa de aire mas cercana.

	Heladas radiativas	Heladas advectivas
Cuando ocurre	Ocurren cuando la noche presenta cielo despejada, atmosfera calma y una baja humedad del aire	Ocurren cuando hay una masa de aire frio, que cubren extensas areas y son independientes de cielo nocturno
Condición de día anterior	Ha habido temperaturas mayores a cero grados durante el día	Días muy fríos (ondas polares) y pueden ser ventosos
Características	El parametro denominado temperatura del punto de rocío es bajo	aire seco en la atmosfera Puede ocurrir por varias noches seguidas

Tabla 2.1: Características de cada tipo de heladas, fuente (Estrada, 2011)

2.4. Areas geograficas con temperaturas mínimas

El servicio nacional de meteorología e hidrología (SENAMHI) proporciona el dato de temperaturas mínimas percentil 10. Este análisis y evaluación permite hallar áreas geográficas con temperaturas mínimas, así como también zonas susceptibles a la presencia de heladas meteorológicas.

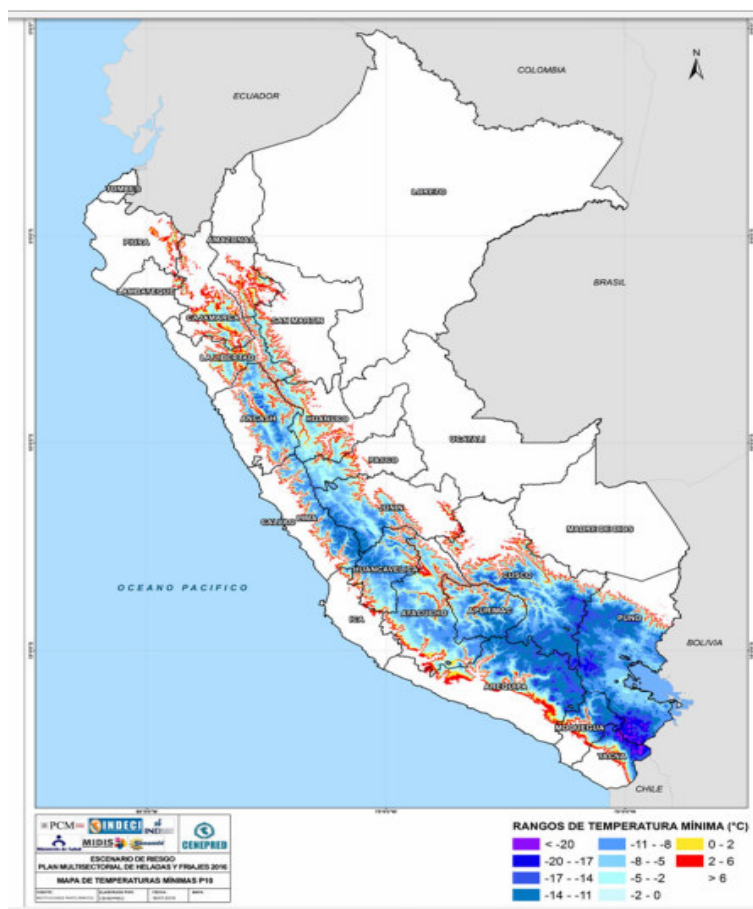


Figura 2.1: Zona susceptible a heladas, fuente <http://www.cenepred.gob.pe/web/>

2.5. Identificación y priorización

Podemos priorizar e identificar zonas de riesgos de las zonas altoandinas se han priorizado 16 departamentos, que son susceptibles a sufrir heladas con muy bajas temperaturas, de esta manera podemos generar ayuda, y generar igualdad de oportunidades para fortalecer y desarrollar las capacidades productivas comunitarias,

coavvuyendo a su desarrollo económico , social y productivo que contribuya a la población.

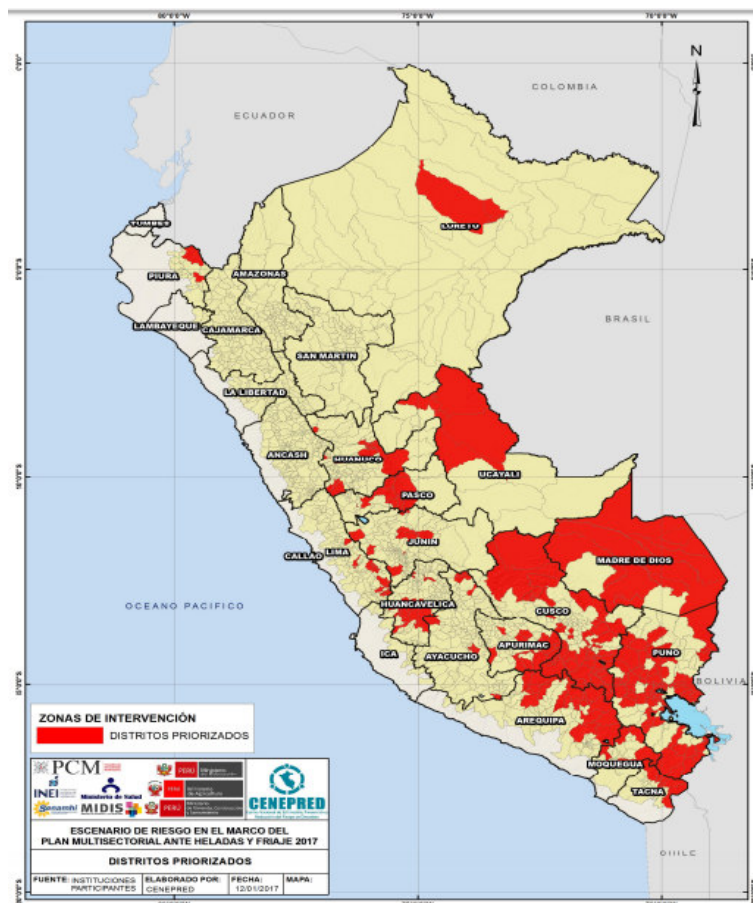


Figura 2.2: Zonas de riesgo en la región Andina del Perú, fuente <http://www.senamhi.gob.pe/?p=distrito-helada-friajes>

2.6. Distritos con zonas críticas ante heladas

Heladas en la region altoandina: Haciendo un analisis y evaluacion de las áreas geográficas con temperaturas mínimas podemos ver e identificar zonas más críticas ante heladas en la zona alto andina del país, con los siguientes detalles.

El Perú presenta grandes variaciones topográficas que determinan una acentuada variabilidad climática, lo que favorece la ocurrencia de eventos hidro climáticos extremos limitan la actividad agropecuaria, como las heladas, granizadas, sequías, entre otros. Las heladas meteorológicas suelen registrarse en general, en las partes

N°	Departamentos	Provincias	Distritos	Fenómeno'
01	Puno	12	68	Heldas
02	Apurimac	5	18	Heladas
03	Arequipa	5	18	Heladas
04	Ayacucho	3	5	Heladas
05	Cusco	9	39	Heladas
06	Huancavelica	4	13	Heladas
07	Huanuco	34	5	Heladas
08	Junin	3	5	Heladas

Tabla 2.2: Distritos con zonas criticas de heladas, fuente <https://www.inei.gob.pe/>

altas de la region andina. y principalmente en la estación seca del invierno; aunque tambien se presentan en las estaciones del verano y la primavera, siendo estas las más dañinas para la agricultura, por encontrarse la mayoría de los cultivos dentro de su etapa vegetativa o productiva, que ocasionan pérdidas importantes en la producción agrícola. Este trabajo nos permitira incorporar el riesgo de ocurrencia de la helada dentro de las actividades de planificación agrícola y ganadera, como emplazamientos para la siembra y construcción de cobertizos en la zona sur del Perú, entre otras actividades.

Entre los elementos del clima vinculados a los riesgos climaticos, se encuentran las temperaturas extremas y entre ellas las heladas, la helada es uno de los factores meteorologicos que dependiendo de su intensidad, duración y fase fenologica en que se encuentra puede provocar serios daños, por eso es de suma importancia conocer el régimen de las helas durante el año y sus características meteorológicas.

2.7. Balance termico en una helada

La ecuacion para un balance de energia, durante un periodo de helada, considerando una superficie lineal, se define segun lo siguiente como flujos termicos de calor mas importantes que intervienen segun la conservación de la energia.

$$R_n = H + H_l + G \quad (2.1)$$

Donde, R_n balance de la radiación de la superficie de la tierra, H flujo del calor debido a la convección, H_l flujo de calor debido al cambio de estado del aire, G flujo

del calor del suelo por conducción (Novoa, 2004).

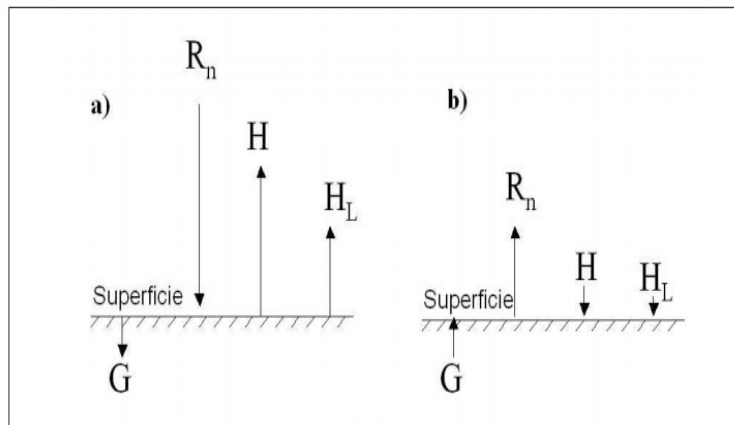


Figura 2.3: Esquema de balance de radiación durante el día y la noche, fuente (Novoa, 2004)

La temperatura mínima es la temperatura más baja alcanzada en un intervalo de tiempo dado. La temperatura mínima absoluta mensual es la temperatura más baja de las temperaturas mínimas mensuales observadas en un mes dado durante un número de años determinado.

2.8. Aspectos físicos

La superficie de intercambio de energía entre la capa de agua y la atmósfera, incluye el calentamiento debido a la penetración de la radiación de onda corta, onda larga y a los flujos debido a la evaporación. El flujo de radiación solar de onda corta de 280 nm a 2800 nm suele medirse directamente. El flujo de radiación de onda larga mas de 2800 nm emitidos por las nubes y vapor de agua atmosférico puede medirse o calcularse a partir de zonas con nubes, temperatura del aire y la humedad. El coeficiente de reflexión o albedo, de radiacion de onda corta varia de un lago a otro y depende del ángulo de incidencia del sol, color del lago y la inclinación de la superficie libre del lago

El flujo de energía de radiación solar de longitud de onda corta: La radiación solar de onda corta que llega a la superficie del lago puede dividirse en cuatro componentes, la profundidad de penetración de la radiación en la columna de agua

depende del coeficiente de extincion para cada ancho de banda y del flujo neto de radiacion de onda corta que penetra en la superficie del agua.

- 1) Rdiación fotosintetica activa (PAR) 45 % , coeficiente de extincion 0.25 (1/m)
- 2) Infrarrojo Cercano (NIR) 41 %, coeficiente de extincion 1.00 (1/m)
- 3) Ultra Violeta A (UVA) 3,5 %, coeficiente de extincion 1.00 (1/m)
- 4) Ultra Violeta B (UVB) 0,5 %, coeficiente de extincion 2.50 (1/m)

El flujo neto (Q_{sw})de radiación solar que penetra en el agua puede ser escrito como

$$Q_{sw} = Q_{sw(total)}(1 - r_a^{sw}) \quad (2.2)$$

Donde, $Q_{sw(total)}$ es el flujo de radiación de onda corta que alcanza la superficie del agua, r_a^{sw} es el albedo de onda corta en la superficie del agua. Para el hemisferio sur esta dado por:

$$r_a^{sw} = R_a^{sw} + a_{sw} \sin\left(\frac{2\pi d}{D} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.3)$$

La radiación de onda corta que penetra en el agua para cada banda de acuerdo con la ley de Beer-Lambert, que se define:

$$Q_z = Q_{sw} e^{-yz} \quad (2.4)$$

donde, z es la profundidad por debajo de la superficie del agua y el coeficiente de extincion para cada capa de flujo de energia de radiacion solar de longitud de onda larga: La radiacion de onda larga se calcula por uno de los tres metodos, dependiendo de los datos de entrada. Tres medidas de entrada se permiten: radiacion incidente de onda larga, radiacion neta de onda larga, y nubosidad. El flujo de radiacion incidente de onda larga, requiere del aporte del albedo y la radiacion de onda larga emitida por la superficie del agua. La radiacion de onda larga que penetra en la superficie del agua es:

$$Q_{lw} = (1 - r_a^{lw}) Q_{lw}(incidente) \quad (2.5)$$

donde Q_{lw} , es el flujo de energía debido a la radiación de onda larga incidente en

la superficie del agua, r_{lw} , es el albedo de la superficie para la onda larga, Q_{lw} (incidente), es la radiación de onda larga incidente en la superficie. La radiación de onda larga emitida por la superficie del agua viene dada por:

$$Q_{lw}(emitida) = \epsilon \sigma T^4 \quad (2.6)$$

donde ϵ es la emisividad de la superficie del agua (0.96), σ es la constante de Stefan Boltzmann ($5,6697 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$), y T es la temperatura absoluta de la superficie del agua, es decir, temperatura de la capa superficial. El flujo neto de energia de radiación de onda larga que queda en la capa superficial es:

$$Q_{lw}(neto) = (1 - r_a^{lw})Q_{lw}(incidente) - \epsilon \sigma T^4 \quad (2.7)$$

2.8.1. Nubosidad

La radiación de onda larga tambien puede ser estimada a partir de las condiciones atmosfericas, utilizando la fraccion de nubosidad ($0 < C < 1$). El flujo de energia neta de radiación incidente sobre la superficie del agua se define según (Hodges and Dallimore, 2006)

$$Q_{lw} = (1 - r_a^{lw})Q_{lw}(aire) \quad (2.8)$$

$$Q_{lw}(aire) = (1 + 0,17C^2)\epsilon_a(T_a)\sigma T_a^4 \quad (2.9)$$

El flujo de energía de radiación de onda larga emitida por el agua esta dado por

$$Q_{lw}(emitida) = \epsilon - w\sigma T_w^4 \quad (2.10)$$

El flujo de radiación de onda larga que penetra en la capa superficial del agua es:

$$Q_{lw}(neto) = (1 - r_a^{lw})(1 + 0,17C^2)\epsilon_a(T_a)\sigma T_a^4 - \epsilon_w\sigma T_w^4 \quad (2.11)$$

2.9. Modelo WRF

El programa WRF fue creado a principios de la decada de los 90 por distintos centros de estudio relacionados a la investigación de los fenómenos de la atmosfera,

principalmente ubicados en América del Norte. El WRF es un modelo numérico mesosescala, no hidrostático, euleriano y compresible, que permite predecir el clima orientado tanto al ámbito de la investigación atmosférica como al pronóstico del tiempo diario. Esta herramienta, permite pronosticar diversas propiedades físicas y químicas de la atmósfera, como el movimiento de masas de aire, humedad, formación de nubes y radiación emitida hacia y desde la superficie terrestre, entre otras (Michalakes et al., 2001)

Desde el punto de vista computacional, el WRF es un programa estructurado en capas y módulos, donde cada módulo presenta un solver de alguna propiedad química o física de la atmósfera. Para cada una de estas propiedades existen distintos módulos, donde varía la precisión del cálculo y en consecuencia el tiempo de ejecución del mismo. Para lograr la correcta simulación de la atmósfera, estos módulos son llamados por capas superiores del programa, siguiendo un orden en particular, debido a que la información de ciertas propiedades atmosféricas es utilizada para los cálculos de otra. En particular, la radiación es una propiedad importante en el modelo y es utilizada por diversos módulos, utilizado en más de 150 países, por más de 25000 usuarios, el sistema WRF, es posiblemente el modelo más flexible del mundo para la investigación meteorológica y la predicción numérica del tiempo, el modelo WRF ha llegado a ser una de las elecciones más populares del mundo, sus aplicaciones van desde simulaciones ultra-alta resolución para investigación atmosférica, hasta el trabajo diario por los centros meteorológicos nacionales. El modelo WRF presenta el estado de la predicción numérica del tiempo (PNT), diseñado para servir tanto para la investigación atmosférica y las necesidades de predicción operativa. Cuenta con más de 25.000 usuarios registrados en 154 países, y es, por lo tanto, podría decirse que el modelo atmosférico más popular en uso hoy en día. En los últimos años, se está empleando para estudios del clima regional y energía eólica. Para la predicción meteorológica operativa, WRF es utilizado por los centros meteorológicos nacionales y de otros organismos, como los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP), la Agencia de Tiempo de la Fuerza Aérea de EE.UU. y la Oficina Central de Meteorología de Taiwán. WRF contiene las ecuaciones físicas de pronóstico y diagnóstico que permitan realizar una predicción con un horizonte temporal prefijado, este módulo incluye también las parametrizaciones que permiten describir los fenómenos físicos cuya escala espacial/temporal es inferior a la resolución fijada en las simulaciones, Para flexibilidad en la investigación y la predicción, el WRF ofrece una serie de opciones para los esquemas en las áreas de procesos

físicos como la microfísica, la convección de cumulos y la capa limite planetaria. WRF tiene su propio sistema de asimilación de datos (WRFDA), y la arquitectura de software del modelo es compatible con la computación paralela masiva y sistema de extensibilidad.

En Peru entre los trabajos de uso con WRF tenemos, modelación de tormentas convectivas, el comportamiento de la atmosfera en Perú, la configuración de WRF implementada en SENAMHI-PUNO. pronóstico de nevadas, estudio de nubes bajo el pacífico (IGP), influencia de la orografía sobre la precipitación de los Andes tropicales (Junquas et al., 2016); mecanismos orograficos asociados a la dinamica atmosferica que veremos mas adelante.

2.10. El WRF en mesoescala

Un modelo de mesoescala es modelo numérico de predicción del tiempo, que va a tratar de simularlos fenómenos atmosfericos en una escala espacial y temporal conocida como mesoescala. Lo cual espacialmente puede oscilar de los cientos de kilometros y temporalmente tanto como horas y dias, ademas,este por ser un modelo numérico de la atmosfera tiene su fundamento en la dinamica atmosferica, la cual se basara en la mecanica y termodinamica de fluidos. Sabemos que dentro de la atmosfera podemos encontrar muchos procesos que no son resueltos por ciertos modelos, pero si debe tenerlos en cuenta. Puesto que en muchos casos logran coincidir en los campos de temperatura, humedad, viento etc.

De la escala del modelo y de esta manera alterar la circulación atmosferica, en este caso dichos procesos han de ser calculados a traves de alguna señal que pueda ser observada mediante los parámetros calculados por el modelo, esta acción recibe el nombre de parametrizar,Para parametrizar cada proceso que no se puede pronosticar directamente por las ecuaciones del modelo requiere un esquema de parametrizacion basado en una representación física o estadistica razonable. Entre los procesos mas importantes que se pueden parametrizar se encuentran:

- a) radiación solar incidente
- b) absorción atmosferica.
- c) reflexión y absorcion por las nubes.
- d) heladas.

- e) temperaturas mínimas.
- f) nieve
- g) lluvia.
- h) precipitaciones.
- i) nevadas
- j) emisión de radiación de onda larga de la superficie de la tierra.

El desarrollo del Modelo Weather Research and Forecasting (WRF) es un esfuerzo inter-institucional realizado para proporcionar un modelo de meso-escala de última generación para pronóstico y sistema de asimilación de datos que sea de utilidad para la comprensión y predicción de las condiciones atmosféricas en la meso-escala. El modelo se desarrolló como un esfuerzo de colaboración entre The National Center for Atmospheric Research (NCAR), The Mesoscale and Microscale Meteorology (MMM), The National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Centers for Environmental Prediction (NCEP), Forecast System Laboratory (FSL), The Department of Defense Air Force Weather Agency (AFWA), Naval Research Laboratory (NRL), The Center for Analysis and Prediction of Storms (CAPS), The Federal Aviation Administration (FAA), con la participación de un gran número de científicos de diferentes universidades a nivel mundial (Skamarock and Klemp, 2008).

El modelo WRF es conveniente para aplicaciones en un amplio espectro de casos, desde escalas de metros a los millares de kilómetros. Se puede utilizar para la investigación y la predicción numérica operacional de las condiciones atmosféricas, asimilación de datos e investigación de parametrizaciones físicas, downscaling de simulaciones climáticas, modelos de calidad de aire, acoplamiento océano-atmósfera y simulaciones idealizadas (ejem: remolinos en la capa-límite, convección, ondas baroclinicas), entre muchas otras aplicaciones (Skamarock and Klemp, 2008).

2.11. Investigaciones en Perú con el modelo WRF

En el Perú se ha ido empleando modelos numéricos de pronóstico del tiempo entre los trabajos de uso con WRF tenemos, por ejemplo, (Gálvez and Douglas, 2006) que trabajaron en modelación de tormentas convectivas donde nos habla de las precipitaciones sobre el lago Titicaca en forma de tormentas convectivas nocturnas inducidas por el lago. (Gálvez and Douglas, 2006) en su trabajo utilizaron WRF para

investigar el papel del lago en la modulación de tormentas y como objetivo proporcionar información sobre el papel de los lagos en seco y húmedo. (Chamorro Gómez, 2012) investigaron los procesos físicos que son responsables de la intensificación de los vientos costeros, en Perú durante el fenómeno de EL Niño, en contraste con el debilitamiento de los vientos alisios. Esta investigación se centra en el análisis de la relevancia de la variación espacial y temporal de la superficie del mar. Para tal propósito se utilizó WRF, que permitió simular el comportamiento de la atmósfera sobre la región del Perú tanto en condiciones normales como en condiciones ideales y permitió evaluar la trascendencia de la variación de la temperatura en la superficie del mar en la intensificación de los vientos costeros. Por otro lado, Saavedra (2013) demuestra que la configuración de WRF implementada en SENAMHI-PUNO es apta para pronosticar nevadas con 24 horas de anticipación.

Rodrigo Baya Crapuchett, Claudio Porrini Buti, Martín N. Pedemonte Quintas y Pablo M. Ezzatti Infante, Desarrollan en el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. Desarrolla el paralelismo funcional ellos plantean que en la última década, Uruguay ha comenzado a migrar su matriz energética hacia energías renovables de origen eólico y solar. Debido a que es difícil prever el comportamiento de los fenómenos atmosféricos asociados a dichas fuentes de generación de energía, desde la Facultad de Ingeniería se están desarrollando herramientas que permitan predecir la generación de la energía asociada en una ventana de corto plazo. Sin embargo, estas herramientas presentan tiempos de ejecución elevados, específicamente en lo que respecta al cálculo del modelo regional de tiempo y clima (WRF). En este trabajo se propone una arquitectura asíncrona del modelo WRF, buscando disminuir los tiempos de cálculo de la radiación solar. Esta noble propuesta alcanza una aceleración de 1.2 veces cuando se compara con la mejor configuración del WRF original, utilizando los mismos recursos de hardware para ambos casos. Marisol Saavedra Murrugarra, plantea la validación del modelo WRF, en el valle de Cajamarca; la configuración utilizada en el modelo WRF, fue capaz de reproducir el ciclo diario de temperatura, el modelo reproduce la modesta variabilidad inter diaria de las temperaturas máximas y mínimas; también el modelo logra captar solo la circulación valle arriba de los vientos durante el día, pero en la noche tiene la dificultad en reproducir la dirección del viento, presentando siempre una subestimación en su magnitud, en cuanto a precipitación el modelo logra reproducir las condiciones secas de invierno y las lluviosas de verano, sin capturar la variabilidad inter diaria. Esto logrará una mejora en la

capacidad de pronóstico para temperaturas mínimas y precipitación en el valle de Cajamarca.

Mourre L. Condom Thomas y Junquas Clementine, hacen una evaluación espacio-temporal de datos de usando WRF de precipitación in situ en un entorno de montaña tropical (Cordillera Blanca, Perú). Sabemos que la estimación de la precipitación es de amplia gama de interés para los climatólogos, mientras que las mediciones in situ siguen siendo escasas se ayudan del modelo atmosférico WRF, para recuperar los patrones de precipitación a escalas de tiempos que van desde 10000 km² en Perú considerando un conjunto de resoluciones espaciales (27 , 9 y 3 kilómetros) las simulaciones de WRF reproducen correctamente el ciclo diurno y se observa que ubican los puntos de lluvia intensa de manera más realista.

Podemos observar que este modelo numérico se ha ido implementando con mayor frecuencia en el Perú, así como en Sudamérica, no cabe duda que constituye una herramienta importante para poder corroborar, explicar y entender el comportamiento de la naturaleza como comportamiento atmosférico Validación de la capacidad del modelo WRF para pronosticar lluvia intensa, usando el método wrf, en Bogotá, Mauricio Jimenez Garcia orientado a objetos y tablas de contingencia, las simulaciones que se evalúan, fueron generadas con el modelo de pronóstico numérico Weather Research and Forecasting (WRF), implementado en la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) operativo desde el año 2008. La versión del núcleo dinámico (ecuaciones de modelo) Este trabajo del modelo consta de tres módulos principales: Para el desarrollo de este trabajo se utiliza el modelo WRF. En un informe técnico del MINAM, vemos como los radares MIRA35C al observar niveles de precipitación y no precipitación, se concluye que la frecuencia de eventos de lluvia y presencia de lluvias donde el mes de febrero es el pico más alto de eventos de lluvias, se concluye también que las nubes controlan el comportamiento de radiación de onda larga y juegan un papel fundamental disminuyendo la probabilidad de ocurrencia de heladas.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Configuración del WRF

En este capítulo se especifican la configuración del modelo con el cual el modelo ha sido simulado para los tres dominios (27km, 9km, 3km). Asimismo se detallan los datos observados que han usado en distintas estaciones meteorológicas.

3.1.1. Pre-procesamiento de WRF

El WRF Preprocessing System (WPS) es un conjunto de programas cuyo objetivo es generar las condiciones iniciales para el modelo WRF y consta de tres programas independientes, las cuales se mencionan son:

El **geogrid.exe**: Este programa calcula la posición de los puntos de retícula de acuerdo a las especificaciones de resolución, número de puntos, posición del centro, entre otros. Los detalles son provistos por el usuario de acuerdo al interés. Una vez posicionados los puntos de la retícula, interpola los datos de topografía, uso de suelo, tipo de suelo, albedo, cobertura vegetal, máscara tierra-agua y demás datos que en el futuro de acuerdo al interés de la investigación pueden ser introducidos. El **geogrid.exe** se ejecuta cada vez que se cambia la ubicación del dominio para nuestro experimento.

El **ungrib.exe**: Este programa permite decodificar datos que vienen en formato grib y escribirlos en el formato que pide el programa **metgrid.exe** para que puedan ser interpolados de tal modo para el modelamiento utiliza el **wrf**.

El **metgrid.exe**: Este programa interpola horizontalmente los datos de atmósfera extraídos por el programa **ungrib.exe** a la retícula definida por el programa

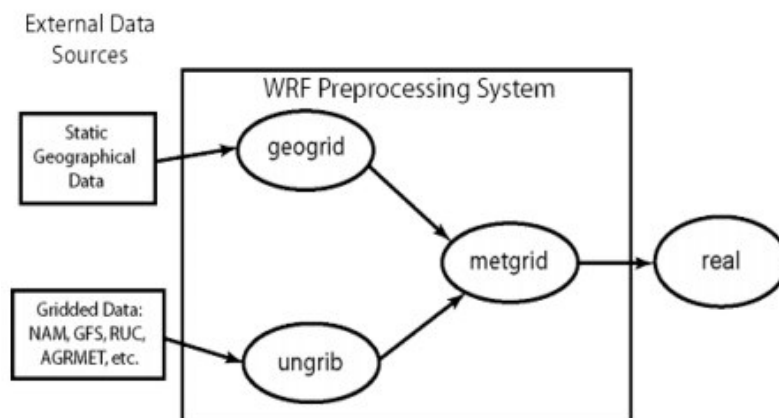


Figura 3.1: Esquema de preprocesamiento son: geogrid.exe, ungrib.exe y metgrid.exe, donde real.exe y wrf.exe son del procesamiento del modelo, fuente (?)

geogrid.exe. Por ejemplo puede tomar un análisis y un pronóstico global e interpolarlo a la retícula del modelo. para mayor ilustracion se muestra la figura 2.5.

3.1.2. Procesamiento del WRF

ARW (Advanced Research WRF) es el modulo principal del modelo WRF ya que contiene la fisica y incluye la quimica, la diferencia con el modelo WRF cuenta con parametrización fisica y dinamica. El modelo puede simular tantos casos reales (utilizando datos reales) como ideales (utilizando datos ideales). por ejemplo, el wrf.exe es utilizado tanto para casos reales como en casos ideales. El modelo consta de proyecciones estereografica Polar, Lambert y Mercator, para el caso de Perú se sugiere usar la proyeccion Mercator, y la coordenadas que utiliza el WRF, solo tiene la transformada en la parte vertical mas no en otras componenetes: meridional y zonal, tal como se expresa:

$$\eta = \frac{P_h - P_t}{\mu} \quad (3.1)$$

Donde P, presión, h componente hidrostática de presión, t altura tope del modelo

3.1.3. Post procesamiento del WRF

El post procesamiento consiste extraer los distintos variables que calcula el modelo WRF que cuenta con mas de 100 variables, por consiguiente para analizar, visualizar, y hacer calculos estadísticos, ya existen varias herramientas de postprocesamiento en este caso mencionan los mas utilizados tales son: el primero Grid Analysis and Display System(GrADS), es una herramienta de visualización de datos meteorologicos, tambien se puede procesar datos en grillas asi como datos de estaciones donde soporta varios formatos binarios (GRIB, NetCDF, etc), Si se interasa usar el GrADS tener encuentra que no lee de manera directa la salida de simulaciones del WRF, para ello se necesita un paquete (ARWpost) que crea archivos de salidas compatibles con el formato de GrADS (.nc,.dat,.ctl) por tanto recien se puede hacer el procesamiento correpondiente.

El paquete AWRpost contiene un archivo de configuración inicial de nombre namelist. AWRpost esta es el que transforma o setea las salidas del modelo WRF, el segundo lenguaje de programación es el Matlab en la comunidad cientifica potencialmente usado, la ventaja consiste que puede extraer directamente los archivos del modelo, sin embargo, lo inconveniente se trata de un software con licencia, El tercero es el NCAR Comando Language NCL que esta preparado precisamente para el procesamiento, analisis y conjunto de plots de cualquier variable, cuarto es el python, potencialmente usado en el mundo. Los 3 programas python, ncl y grads son de distribución gratuito, sin embargo, todos ellos permiten la construcción de scripts para la automatización de los procesos graficos.

3.2. Simulación del WRF

Se realizó simulaciones desde 00 UTC del 01 de agosto al 23 UTC del 31 de agosto de 2015, con una resolución de 27 km, 9 km y 3 km. En dominio de mayor resolución contine las estaciones de la región de Puno. Además de utilizar 29 niveles en la vertical. Las condiciones de borde se obtuvieron a partir del reanálisis NCEP FNL. A la vez se mantuvo activo el parámetro de cumulus. Para mayor detalle se muestra en la tabla 3.1 las parametrizaciones que se utilizó para el presente estudio.

El modelo WRF incluye una amplia gama de posibles parametrizaciones. Aquí, nos centramos principalmente en la capacidad de reproducir la temperatura. Para validar la simulaciñ se considera datos observados que han sido descargadas desde

la pagina de SENAMHI, los datos son diarias de las variables: Temperatura mínima y máxima, La validación ha sido llevada a cabo mediante la comparación cualitativa y cuantitativa de las salidas numéricas con respecto a los valores observados. La comparación se realizó en tres estaciones ubicado dentro del área de estudio las cuales son: estación Paratia ubicado en el distrito Paratia, provincia de LAMPA, región Puno, estación Vilavila ubicado en distrito de Vilavila provincia de Lampa, región Puno y finalmente la estación Juliaca ubicado en distrito Juliaca provincia de San Roman region Puno.

Física	Parametrización
mp_physics	WSM6
ra_lw_physics	RRTM scheme
ra_sw_physics	Dudhia scheme
sf_sfclay_physics	Monin-Obukhov scheme
bl_pbl_physics	YSU
cu_physics	Kain Firtsch

Tabla 3.1: Esquema de parametrización utilizado para ejecución del modelo WRF

En figura 3.2 se muestra los dominios el de 27 km que viene ser el dominio mayor, el de 9km dominio intermedio y el dominio de 3k dominio de alta resolución , este dominio esta centrado en el area de estudio. Para que comienze a simular el modelo, requiere fundamentalmente de condiciones iniciales, que son data global del reanálisis de campo de vientos, temperatura.

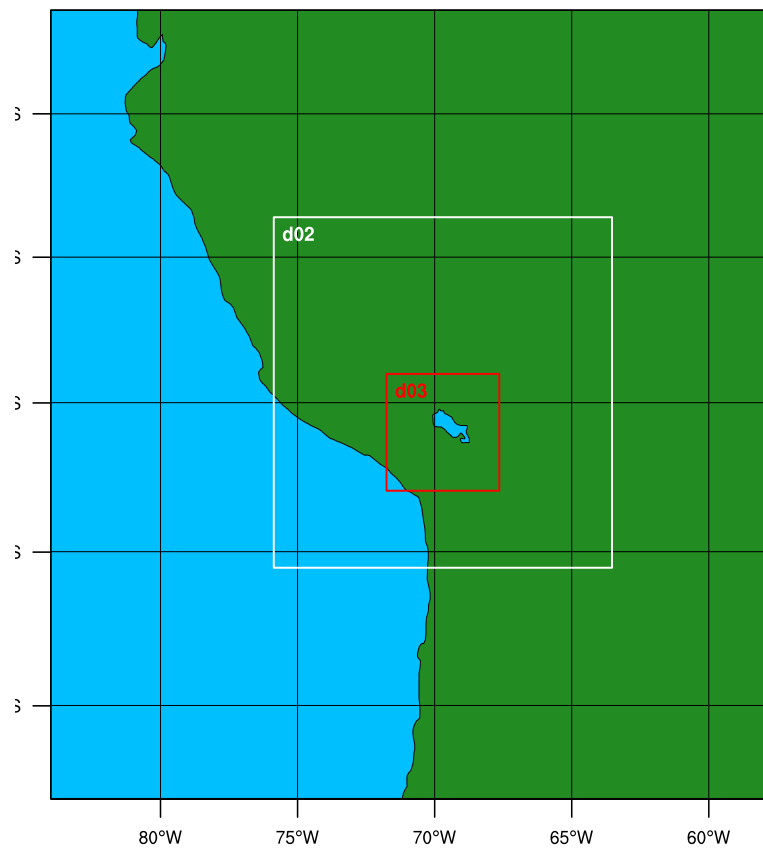


Figura 3.2: Localización del área de estudio

Capítulo 4

Resultados y discusiones

En la figura 4.1 se observa el ciclo diurno de la temperatura a 2 metros de altura desde la superficie durante el mes de agosto de 2015. La subfigura 4.1a corresponde a la estación Lampa, el eje X indica la hora desde 1 hasta 24 horas en UTC, y el eje Y representa días del mes de agosto. En esta subfigura se observa dos franjas muy pronunciadas, el primero, entre las 3 y 12 horas UTC esto se observa todos los días del mes de agosto presentando temperaturas por debajo de cero grados. Asimismo se observa los días más frías entre 10 y 20 días del mes de agosto y los últimos días del mes. Por otro lado, entre las 15 y 24 horas durante el mes de agosto se observa temperaturas por encima de cero grados siendo los días 15 y 25 con temperaturas altas. En la subfigura 4.1b se muestra la variación de la temperatura en esta se observa que entre las 6 y 13 horas UTC tiene temperatura por debajo de cero grados, con temperaturas muy bajas entre los días 10 y 17, 19 y 24 y 28 y 31 días de agosto de 2015. En cambio entre las 17 y 23 horas tiene temperaturas por encima de cero grados, además existen días con temperaturas altas específicamente los días entre 1 y 26 días del mes de agosto.

De las subfiguras 4.1, se puede afirmar que existen dos fenómenos pronunciados, tanto en la estación Lampa y Juliaca. Especialmente en la estación Lampa se observa entre 1p.m y 7 a.m (hora local) temperaturas mínimas y durante el día entre 2 p.m y 6p.m (hora local) se observa temperaturas más altas. El primero es acorde a lo que se sabe por estudios anteriores de que efectivamente durante la madrugada se presentan temperaturas muy bajas lo cual genera heladas intensas. En cambio el segundo, no está presentando de manera adecuada lo esperaría es tener temperatura

altas entre 1 y 3 p.m, lo que indica que el modelo estaria presentando con una ligera desfase temporal de 3 horas.

En la figura 4.2 se muestra la comparación de la temperatura máxima y mínima en la estación Juliaca. La figura 4.2a representa la temperatura máxima donde en el eje X se indica días del mes de agosto, y en el eje Y se indica valores de la temperatura en grados celcius. los primeros días hasta 7 de agosto hay diferencia de 4 grados, sin embargo hay una correlación aceptable ya que muestra un patrón de comportamiento. A partir del día 7, en el observado radicalmente disminuye la temperatura llegando hasta 9 grados a la vez el modelo logra representar el decaimiento de la temperatura llegando hasta 12 grados. Luego despues del día 15 en el observado comienza aumentar y en el modelo aumenta ligeramente. Por otro lado, en la figura 4.2b se representa temperaturas mínimas donde las temperaturas observa presenta fuerte variación con picos muy angostos a partir del día 16 el modelo mejora representar la variación de la temperatura.

En la figura 4.3a se muestra la variación de la temperatura máxima en la estación Paratia, desde 1 hasta 7 dias de agosto existe una diferencia de 4 grados, pero se observa que el modelo representa el patrón de comportamiento de la temperatura, despues de este día en el observa la temperatura comienza a descender hasta llegar 6 grados, en este descenso el modelo logra reporducir pero con fase temporal, luego en el observado aumenta la temperatura hasta un pico de 14 grados, en cambio el modelo de manera aceptable logra reprecentar el comportamiento de la temperatura. Por otro lado, en la figura 4.3b se muestra la variación de la temperatura mínima en el observado existen picos angostos que tienen alta variabilidad sobre todo esto se observa entre los dias entre 7 y 21 del mes de agosto de 2015. El modelo despues del día 15 mejora su representación de la variación de la temperatura mínima.

En la figura 4.4a se muestra la variación de la temperatura máxima en la estación Vilavila, La temperatura observada tiene poca variación hasta 20 dias del mes de agosto. La temperatura modelado presenta poca variación se puede observar que el modelo logra representar el patron de comportamiento de la temperatura máxima esto hasta el día 26. En la figura 4.4b se presenta la temperatura mínima, la temperatura observada indica alta variación entre los dias 7 y 17, el modelo comienza con temperatura de alrededor -1 grados, ligeramente aumenta hasta 1 grado luego

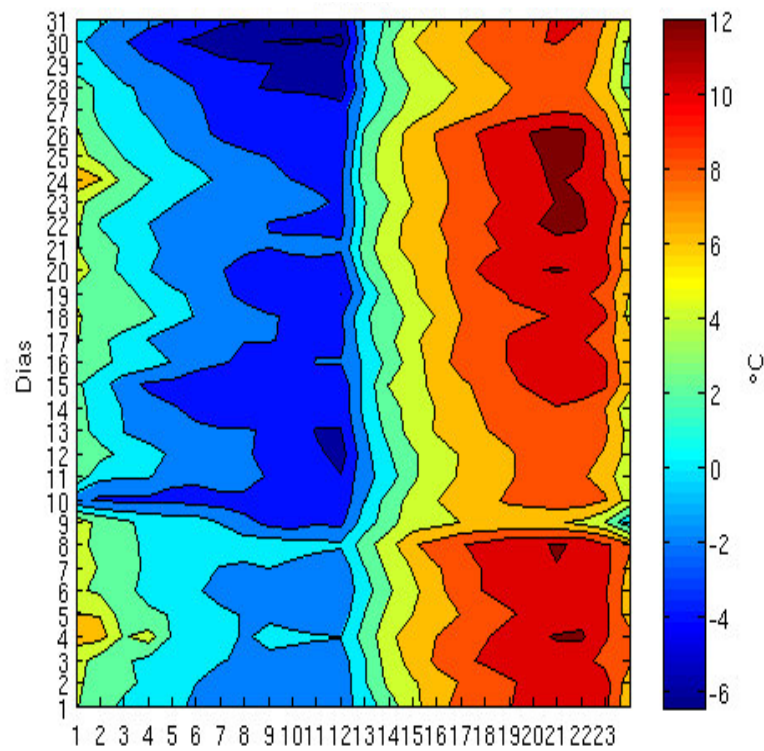
disminuye bruscamente hasta -4 grados despues presenta variaciones de ascensos y descensos.

De la figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se puede encontrar como resultado preliminar, que las temperaturas máximas tienen fuerte descenso desde 19 grados hasta 9 grados (en estación Juliaca) durante el día desde 9 y 13, en estación Paratia se nota descenso desde 15 grados hasta 6 grados durante los días desde 6 hasta 15 y en estación Vilavila presenta descenso desde 16 grados hasta 5 bajo cero grados, esto se observa a finales del mes agosto. En cambio las temperaturas mínimas en la estación Juliaca varía desde 14 bajo cero hasta 3 grados por encima de cero durante los días 10 y 12. En estación Paratia desciende desde 2 grados hasta -12 grados los días 8 y 11 y finalmente en estación Vilavila dos modas de variación primero desde -3 hasta -11 grados y el segundo desde 1 hasta -7 grados bajo cero. De los cuales para temperatura máxima observada tienen similar comportamiento entre la estación Juliaca y Paratia que presentan amplitud muy significativamente, en cambio la estación Vilavila su amplitud de variación es bastante pequeño de la temperatura máxima. Por otro lado, si notamos la variación de temperatura mínima en las tres estaciones (Paratia, Juliaca y Vilavila) presentan similar amplitud las tres estaciones tienen dos modas en el mismo tiempo. Lo que indica que estos días hubo presencia de heladas de diferentes magnitudes. El modelo tanto para temperatura máxima y mínima ligeramente logra representar el patrón de comportamiento de las amplitudes de la temperatura, esto es posible se debe a que la simulación es realizada cada una hora y para comparar con datos diarios se promedia, entonces al promediar se pierden los picos de temperatura tanto máximas y mínimas.

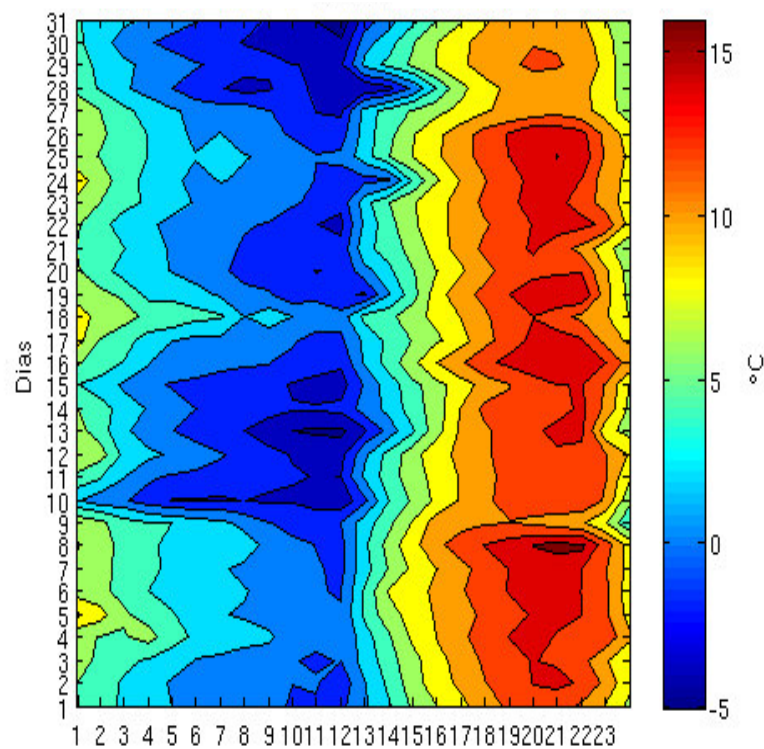
En la figura 4.5 se muestra la distribución espacial del promedio de temperatura a 2m de altura a nivel de Puno durante el mes de agosto de 2015, los puntos negros indican la ubicación de las estaciones analizadas en figuras anteriores. En la figura 4.5a indica la temperatura promedio máxima, se observa en el medio de la figura 4.5a valores de temperaturas uniformes que presentan alrededor de 8°C, específicamente esta área representa el lago Titica. Por otro lado alrededor de la estación de Juliaca presentan valores de temperatura de 18°C, siendo este valor mayor con respecto a los valores de la estación Paratia. En cambio en la estación Vilavila no hay mucha variación con respecto a la estación de Juliaca, Asimismo se observa que a partir de la estación de Paratia se extiende hacia el Sur una franja con valores de temperatura frías en promedio con valores de 5°C. En la figura 4.5b se muestra la distribución del promedio de la temperatura mínima para el mes de agosto, el Lago Titica presenta

temperaturas alrededor de -10°C , la temperatura alrededor de la estación de Juliaca tiene -5°C , los valores de la temperatura en la estación Vilavila son similares que el de Juliaca y esta ubicada en la transición entre dos franjas bien marcada relativamente entre temperaturas más frías y frías. La estación de Paratia tiene temperaturas mas frías con valores de -15°C , a partir de esta estación se extiende hacia el Sur temperaturas muy frías con valores en promedio de -15°C .

De la figura 4.5 se puede concluir que existen variabilidad de la temperatura espacial a nivel de la región Puno, esta variación se presenta con bastante claridad donde existen topografía variada. Esto se observo cuando se comparó entre dos localizaciones Paratia y Juliaca ambos estaciones se encuentran no mayor de 50km de distancia. En esta distancia relativamente pequeña presenta fuerte gradiente de temperatura mínima, similarmente sucede con la temperatura máxima. En esta región la gradiente de temperatura encontrada es posible fundamentalmente por la topografía propia del lugar puesto que la presencia de alta variación orográfica genera condiciones atmosféricas propiamente de cada localidad, tal es así en promedio Paratia se encuentra ubicada a 4400 metros de altitud en cambio la estación de Juliaca esta a 3820 metros de altitud.



a: Estación Lampa



b: Estación Juliaca

Figura 4.1: Se muestra el ciclo diurno de la temperatura a una altura de 2m sobre la superficie durante el mes de agosto de 2015 desde la salida de WRF a) Estación Lampa b) Estación Juliaca

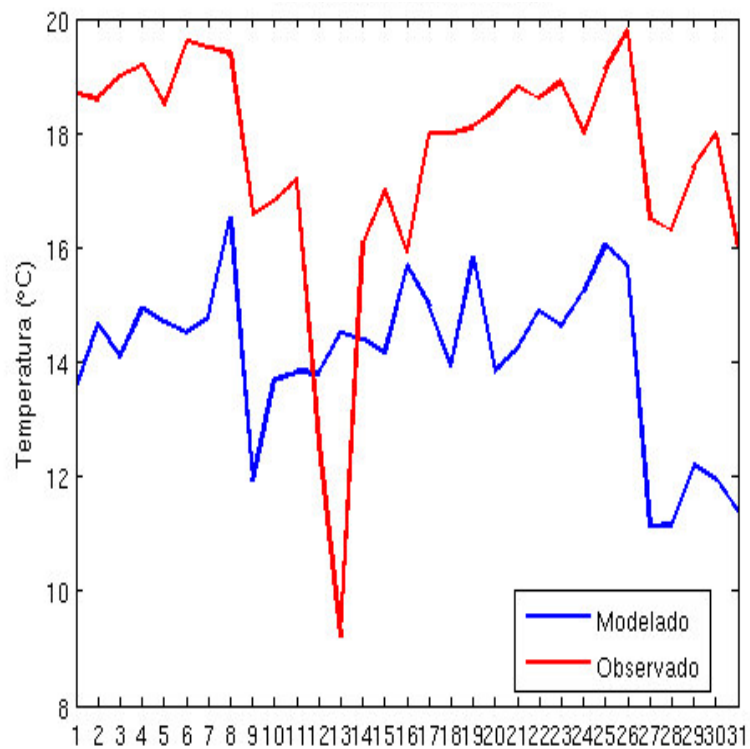
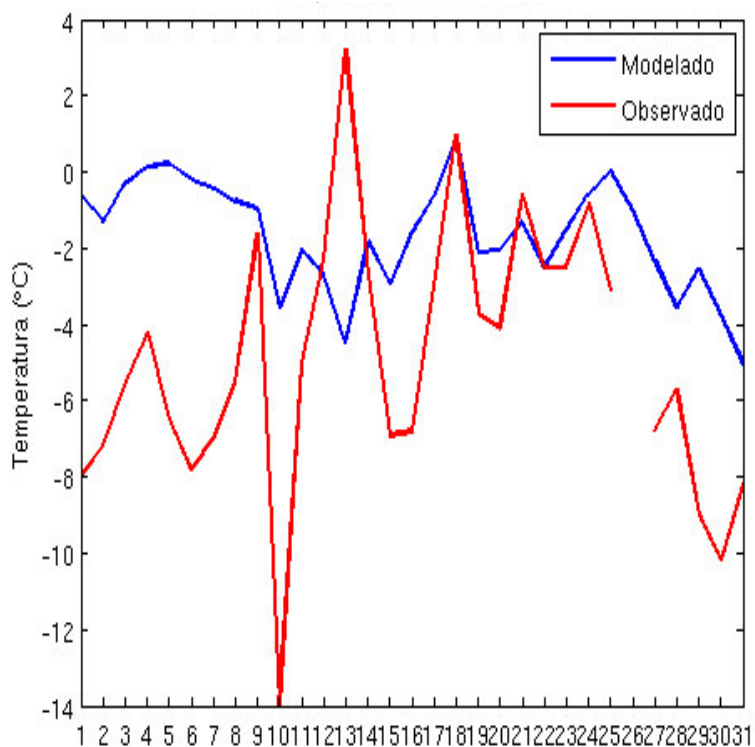
**a:** Estación Juliaca**b:** Estación Juliaca

Figura 4.2: Se muestra la comparación de temperaturas máximas y mínimas en estación Juliaca, durante el mes de agosto de 2015 tanto observado así como el modelado a) temperatura máxima b) temperatura mínima

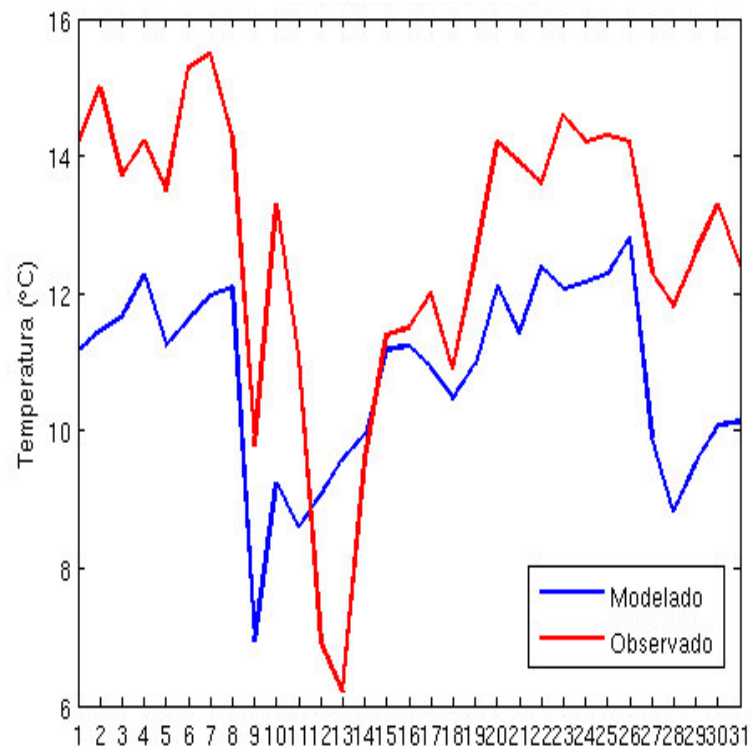
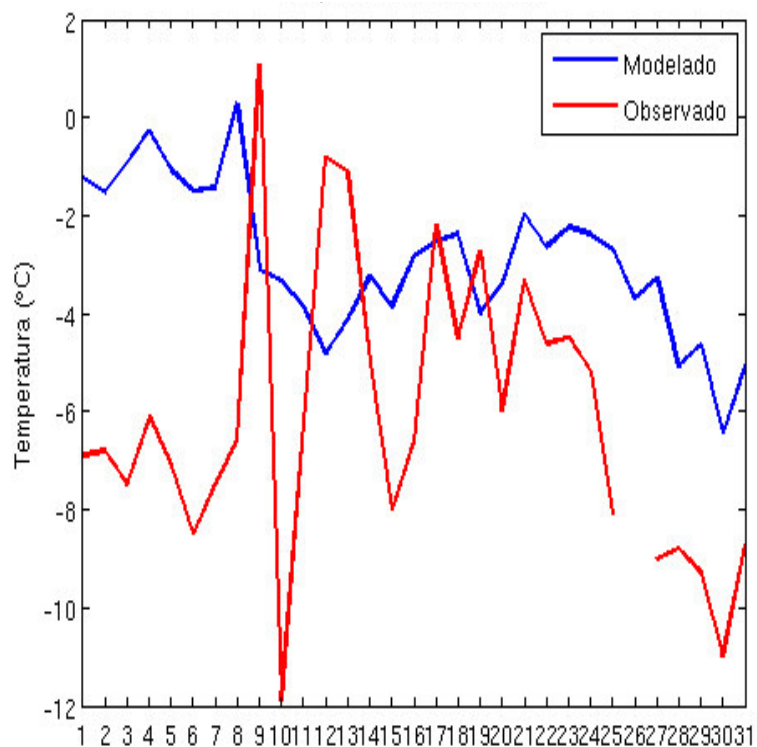
**a:** Estación Paratia**b:** Estación Paratia

Figura 4.3: Se muestra la comparación de temperaturas máximas y mínimas en estación Paratia, durante el mes de agosto de 2015 tanto observado así como el modelado a) temperatura máxima b) temperatura mínima

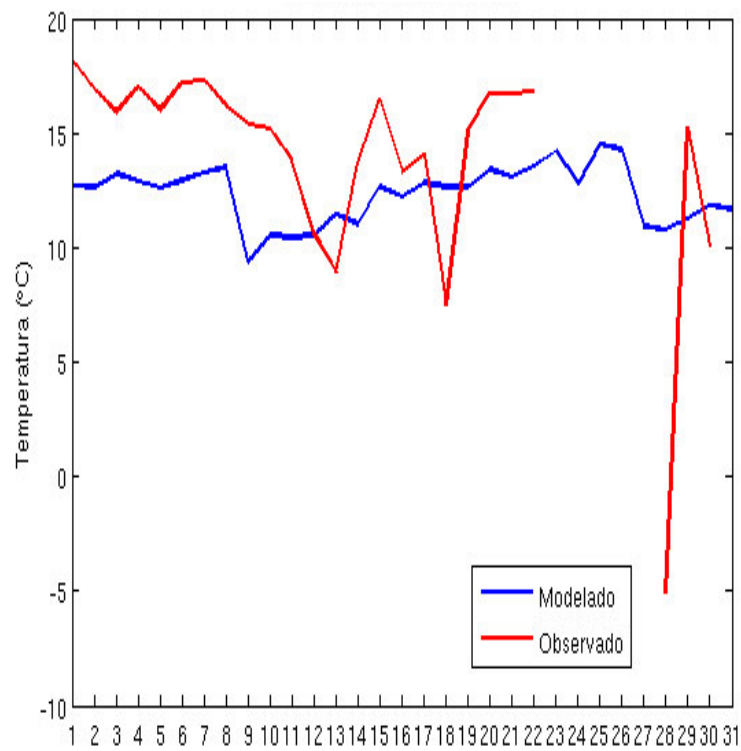
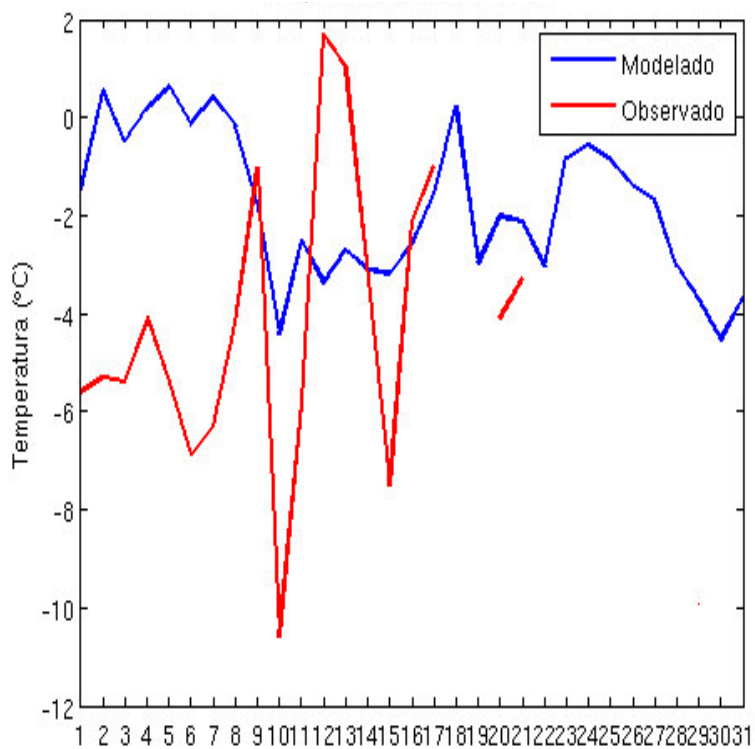
**a:** Estación Vilavila**b:** Estación Vilavila

Figura 4.4: Se muestra la comparación de temperaturas máximas y mínimas en estación Vilvaria, durante el mes de agosto de 2015 tanto observado así como el modelado a) temperatura máxima b) temperatura mínima

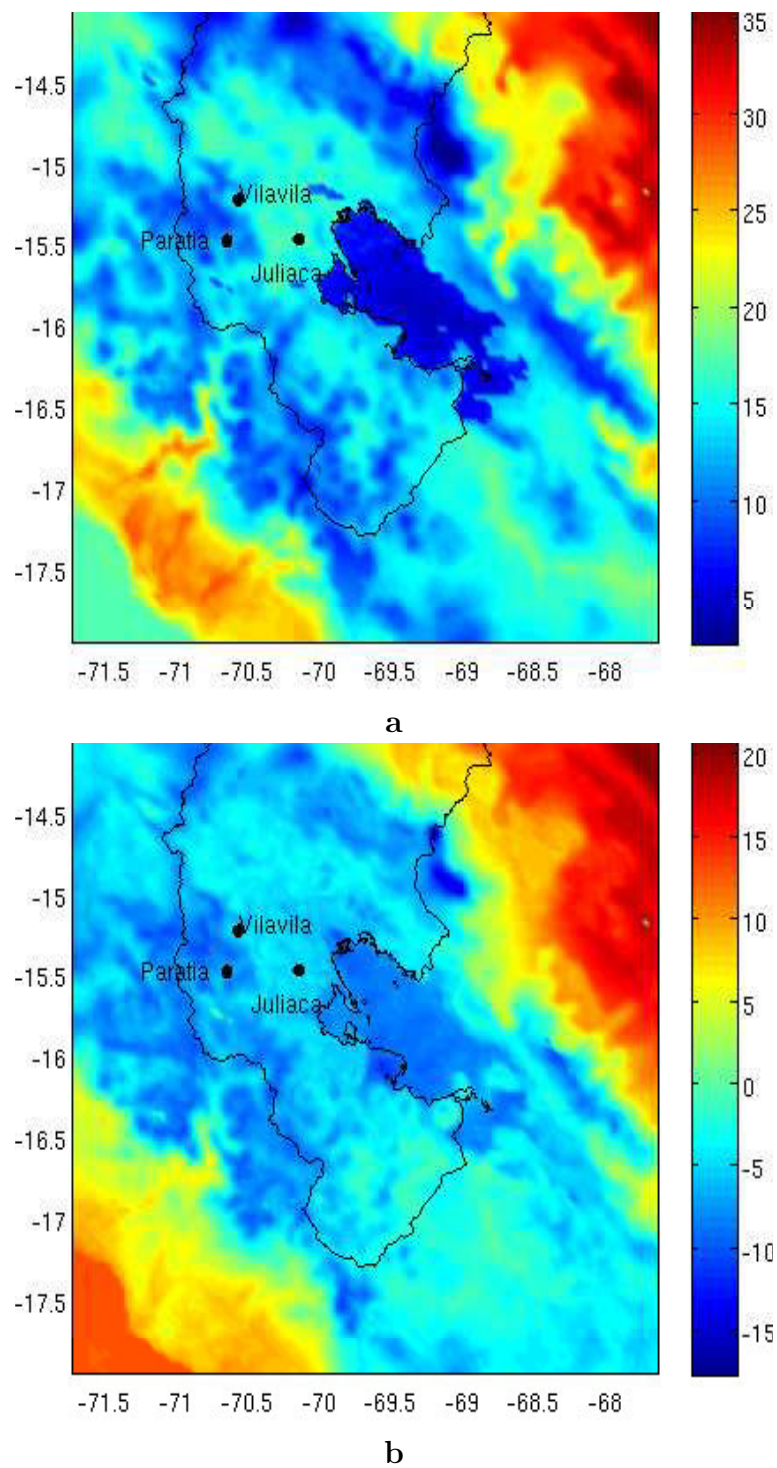


Figura 4.5: Se muestra la distribución espacial del promedio de la temperatura a 2m de altura a nivel de puno durante el mes de agosto de 2015 a) temperatura máxima b) temperatura mínima

Capítulo 5

Conclusiones

El objetivo del presente trabajo consistió evaluar la capacidad del modelo WRF, para representar las temperaturas máximas y mínimas, asimismo comprender las temperaturas mínimas que están principalmente asociadas a heladas. Como resultado de este estudio se encontró que el modelo WRF ligeramente logra representar las variaciones de las amplitudes de las temperaturas mínimas y máximas mostrando los patrones de comportamiento, la poca capacidad de representar por el modelo es posible mejorar haciendo una comparación y validación con data observada instantánea o promediada. En este estudio solo se comparó con la data observada diaria con temperatura promediada de cada 1 hora. El modelo WRF reproduce el ciclo diurno mostrando temperaturas mínimas durante la madrugada entre las 1 a.m y 8 a.m, y temperaturas altas entre las 2 p.m y 6p.m, este ciclo de representación tiene aproximadamente un desfase temporal de 3 horas. Este desfase temporal presentado por el modelo es normal puesto que en algunos casos la data global tiene la misma situación. Con respecto de la distribución espacial del modelo WRF se encontró como resultado que entre la estación de Juliaca y Paratia existen fuerte gradiente de temperatura mínima y máxima, mostrando una franja bien definida desde la estación Paratia hasta la parte del Sur. Por consiguiente a partir del resultado nos permite afirmar que la gradiente de temperatura promedio tanto de mínima y máxima fuertemente dependen de las características orográficas.

Bibliografía

- Artunduaga, R. and E. Torrez, 1982: Principios básicos de la ocurrencia de las heladas y su control. *Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) San José, Costa Rica*.
- Chamorro Gómez, A. V., 2012: Simulación de la intensificación del viento frente a la costa del Perú durante un evento El Niño aplicando el modelo atmosférico wrf (weather research and forecasting).
- Díaz, F., 1983: Práctica de la defensa contra las heladas, Llerida, ed.
- Estrada, R. D., 2011: Ajustes al índice de potencialidad agrícola de turc para lograr mejores diseños de los mecanismos para compartir beneficios en los Andes. *Documento de trabajo*, 4.
- Gala, F. B., 1993: Las heladas y su incidencia económica en la agricultura de Murcia. *Papeles de geografía*, 37–51.
- Gálvez, J. M. and M. W. Douglas, 2006: Modulation of rainfall by Lake Titicaca using the wrf model. *Proceedings of*, volume 8, 24–28.
- Garreaud, R. and J. M. Wallace, 1998: Summertime incursions of midlatitude air into subtropical and tropical South America. *Monthly Weather Review*, **126**, 2713–2733.
- GÓMEZ, G. M. C., 2010: Las heladas en el Perú y el mundo.
- Hodges, B. and C. Dallimore, 2006: Estuary, lake and coastal ocean model: Elcom v2. 2 science manual. *Centre for Water Research, University of Western Australia*.
- Junquas, C., L. Li, C. Vera, H. Le Treut, and K. Takahashi, 2016: Influence of South America orography on summertime precipitation in southeastern South America. *Climate dynamics*, **46**, 3941–3963.

- Michalakes, J., S. Chen, J. Dudhia, L. Hart, J. Klemp, J. Middlecoff, and W. Skamarock, 2001: Development of a next-generation regional weather research and forecast model. *Developments in Teracomputing*, World Scientific, 269–276.
- Novoa, R., 2004: Nuevos desarrollos agronómicos para incrementar el uso eficiente del agua. *Simiente*, **74**, 7–25.
- Pereyra Díaz, D., S. J. Beltrán Cruz, M. Tiscareño López, and J. A. A. Pérez Sesma, 2009: Periodo libre de heladas para el estado de aguascalientes y su relación con el niño. *Investigación y Ciencia*, **17**.
- Skamarock, W. C. and J. B. Klemp, 2008: A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *Journal of Computational Physics*, **227**, 3465–3485.
- Wang, W., D. Barker, J. Bray, C. Bruyere, M. Duda, J. Dudhia, D. Gill, and J. Michalakes, 2007: User's guide for advanced research wrf (arw) modeling system version 3. *Mesoscale and Microscale Meteorology Division–National Center for Atmospheric Research (MMM-NCAR)*.
- <http://www.cenepred.gob.pe/web/>
- <http://www.senamhi.gob.pe/?p=distrito-helada-friajes>
- <https://www.inei.gob.pe/>
- <http://investigacion.upeu.edu.pe/conacin/index.php?id=acerca-de-puno>